

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОЙ МИНИМИЗАЦИИ ТКЛР В УГЛЕРОДИСТЫХ ИНВАРНЫХ СПЛАВАХ

Среди литейных сплавов инварного класса на основе систем железо-никель и железо-никель-кобальт наиболее технологичными с точки зрения производства фасонных и крупногабаритных отливок являются сплавы, легированные углеродом. Однако применение этих сплавов для деталей особо высокой точности сдерживает то обстоятельство, что по уровню главной служебной характеристики – температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР) они уступают безуглеродистым инварам и тем более суперинварам. Поэтому задача разработки углеродсодержащих инварных сплавов, обладающих термостабильностью уровня, по крайней мере, обычных инваров, является весьма перспективной.

Имеющиеся в литературе отдельные эмпирические данные не раскрывают принципа и конкретных условий получения минимальных значений ТКЛР в инварах, легированных углеродом. Наш анализ показывает, что для уменьшения ТКЛР углеродсодержащих инварных сплавов любого известного состава необходимо оптимизировать соотношение между связанным и свободным углеродом. Для осуществления же наиболее глубокой минимизации ТКЛР требуется, во-первых, выбрать такой состав углеродистого инварного сплава по основным компонентам, который обеспечивает минимально возможное тепловое расширение матрицы, и, во-вторых, оптимизировать распределение углерода между его раствором в матрице и включениями графита.

Обосновать данные заключения можно следующим образом. Углеродистые инварные сплавы гетерогенны: матричная фаза представляет собой раствор углерода в аустените, а второй фазой в реальных отливках является графит. Хорошо известно, что ТКЛР гетерогенных сплавов подчиняется правилу аддитивности. В данном случае анализа удобно воспользоваться формулой

$$\alpha = \alpha_m + (\alpha_r - \alpha_m) \cdot V_r,$$

где  $\alpha$ ,  $\alpha_m$ ,  $\alpha_r$  – ТКЛР сплава, матрицы и графита соответственно;

$V_r$  – объемная доля графита.

По имеющимся в литературе экспериментальным данным в железоникелевых инварных сплавах углерод по-разному влияет на  $\alpha_m$ . В сплавах доэкстремальных составов (< 36 % Ni) его небольшие добавки заметно понижают ТКЛР, а в сплавах экстремального и заэкстремального составов ( $\geq 36$  % Ni) – существенно повышают. В последнем случае по оценкам ряда авторов прирост ТКЛР составляет от  $0,3 \cdot 10^{-6}$  до  $0,7 \cdot 10^{-6}$  K<sup>-1</sup> на каждые 0,1 % углерода, растворенного в аустените.

Отрицательное влияние углерода на  $\alpha$  любых инварных сплавов за счет аддитивного вклада графита менее значимо. Как показывают наши расчеты, при  $\alpha_m$  уровня  $(1-2) \cdot 10^{-6}$  K<sup>-1</sup> ТКЛР сплава при увеличении содержания углерода, уча-

ствующего в формировании включений графита, на 0,1 % повышается не более, чем на  $0,03 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

На основе проведенного анализа разработана методика графо-аналитического выбора оптимальных составов и режимов графитизирующей термообработки, совместно обеспечивающих достижение минимально возможных значений ТКЛР в углеродистых инварных сплавах, в том числе в инварных чугунах.